

筆者は本稿の概要を、2014年3月に岐阜大学で開催された化学工学会第79年会化学産業技術フォーラムで発表した。ここに掲載するのはその詳細だが、工業通信社が発行する「化学装置」の2014年3月号と4月号に掲載されたので、許可を得て転載する。

(はじめに)

近い将来において、ごみ焼却発電設備を導入する清掃工場が拡大し、すでに発電している工場では発電効率の向上が促進されるであろう。インセンティブは2012年7月から始まった再生可能エネルギー電力の固定価格買い取り制度である。現在、固定価格が設定されているのは、太陽光発電、風力発電、地熱発電、水力発電、バイオマス発電の5種類である。バイオマス発電はバイオエネルギーの種類に応じて、さらに5種類に分けて価格が設定されており、ごみ焼却発電は消費税別で1kWhあたり17円である。この単価は2013年度の設定で、将来は減額される可能性があるが、当分は大きく変わらないであろう。従来から清掃工場のごみ焼却発電で得られる電力は、電気事業者に卸売られており、その単価は電気事業者との契約で決められている。契約単価の水準は、朝8時から22時までは10円/kWhから12円/kWh程度、22時から朝の8時まででは5円/kWh程度である。この単価水準が、プラスチックなど非バイオ成分の寄与分を除いて17円/kWhになったのだから、清掃工場には大きな収益増加が期待できる。そこで本稿では、前段で日本の清掃工場とごみ焼却エネルギーの利用形態、ごみ焼却と発電の方法、発電効率向上策、期待できる発電効率の水準について述べる。続く中段では、発電設備の導入や発電効率の向上で得られる期待収益を推算する。後段ではごみ焼却発電推進のビジネスシナリオと、新たな発電関連設備投資に有効なファイナンススキームを提案する。本稿が清掃工場の関係者と、設備事業者の参考になることを期待している。なお、「ごみ焼却発電の拡大と発電効率の向上」については、本稿と重複する部分もあるが、筆者が別のレポートに技術内容と創エネルギー効果を紹介している。必要なら参照して頂きたい。①化学装置2013年6月号および7月号、②化学工学会SCE・NetのHP、③筆者のHP（内容はレポートと、2013年3月に開催された化学工学会の化学産業技術フォーラムで発表したスライド。） (<http://www11.ocn.ne.jp/~matsumak/sub3.htm>)

1. 清掃工場の種類と規模、 およびエネルギーの利用 形態

日本では平成 23 年度に一般廃棄物が 4,540 万トン発生した。環境省の資料によると、この 78%にあたる 3,540 万トン

が全国 1,211 ヶ所の清掃工場（ごみ焼却工場）で焼却されている。したがって、清掃工場の 1 日平均焼却量は約 80 トンになる。清掃工場の規模は地域によって大きな隔たりがあり、大都市には 24 時間連続稼働の全連続式と呼ばれる清掃工場が多く、平均処理能力は 1 日 249 トンである。一方、人口が中規模の市町村には、1 日 16 時間稼働の准連続式といわれる清掃工場が多く、平均処理能力は 1 日 72 トンである。さらに人口規模の小さな市町村には、バッチ式と呼ばれる 1 日の運転が 8 時間に達しない小規模工場が多く、平均処理能力は 1 日 20 トンである。表 1 は平成 23 年度のデータだが、全清掃工場の 54%にあたる全連続式の清掃工場が、総処理能力の 87.8%を占めている。一方、バッチ式の清掃工場は全清掃工場の 28%もあるが、処理能力は総処理能力の 3.7%に過ぎない。小規模工場は効率が低だけでなく、ダイオキシンなどの環境対策が困難なことから、近年は集約化と廃炉が進んでいる。小規模工場が多いのは、清掃工場が市町村単位で整備され、行政区域内処理を原則としてきたからである。

清掃工場が発生する燃焼排ガスのエネルギーは、全国 1,211 ヶ所の清掃工場のうち 791 工場が表 2 に示す複数の用途に利用している（環境省・平成 23 年度資料）。発電しているのは 314 工場とされているが、電気事業者に売電しているのは 189 工場に過ぎない。したがって、125 工場は自家消費専用発電と推察される。他方、420 工場は燃焼排ガスのエネルギーを利用していない。

表 1. 日本のごみ焼却施設（清掃工場）

焼却方式	施設数	処理能力（トン／日）		
		平均	全体	比率（%）
全連続式	658（54%）	249	163,574	87.8
准連続式	221（18%）	72	15,889	8.5
バッチ式	332（28%）	20	6,793	3.7
計	1,211（100%）	154	186,256	100.0

出典：日本の廃棄物処理、平成 23 年度版（環境省）

表 2. エネルギー利用形態別の清掃工場数

全清掃工場		1211	
エネルギー利用なし		420（35%）	
エネルギー利用あり		791（65%）	（用途）
工場内利用	温水	（720）	給湯・暖房
	蒸気	（246）	給湯・冷暖房
	電力	（312）	動力・照明
工場外利用	温水	（233）	給湯・暖房
	蒸気	（103）	給湯・冷暖房
	電力	（189）	動力・照明

注：同一工場の重複利用が含まれている。出典：環境省 HP

2. ごみ焼却と発電の方法

図1はストーカー式焼却炉を使用している清掃工場の工程である。ストーカーというのは、炉底に設置する短冊状の火格子のことで、機械駆動で前後に動き、ごみを乾燥ゾーン・燃焼ゾーン・後燃焼ゾーンに送る。この方式が全連続式清掃工場の8割から9割を占めている。ごみ焼却発電の最初の工程は、ボイラーによる飽和蒸気の発生と燃焼ガスの冷却である。焼却炉は850℃から900℃でごみを焼却するが、燃焼ガスには煤塵や有害物質が含まれている。このため集塵機で煤塵を除去し、さらに塩素ガスなどの有害物質を除去するのだが、そのためには燃焼ガスの温度を200℃程度まで下げなければならない。ボイラーの役割は、燃焼ガスを冷却すると同時に廃熱を回収し、発電に使用する蒸気を製造することにある。発電する場合の第2工程は蒸気過熱器で、ボイラーで発生した飽和蒸気を加熱し、温度を上げて相対湿度を下げる。湿度の低い乾いた蒸気にするのは、下流のタービンで温度が下がっても水滴が生じないようにするためである。水滴が発生すると、タービンの回転羽根（ブレード）に損傷を与えるからである。

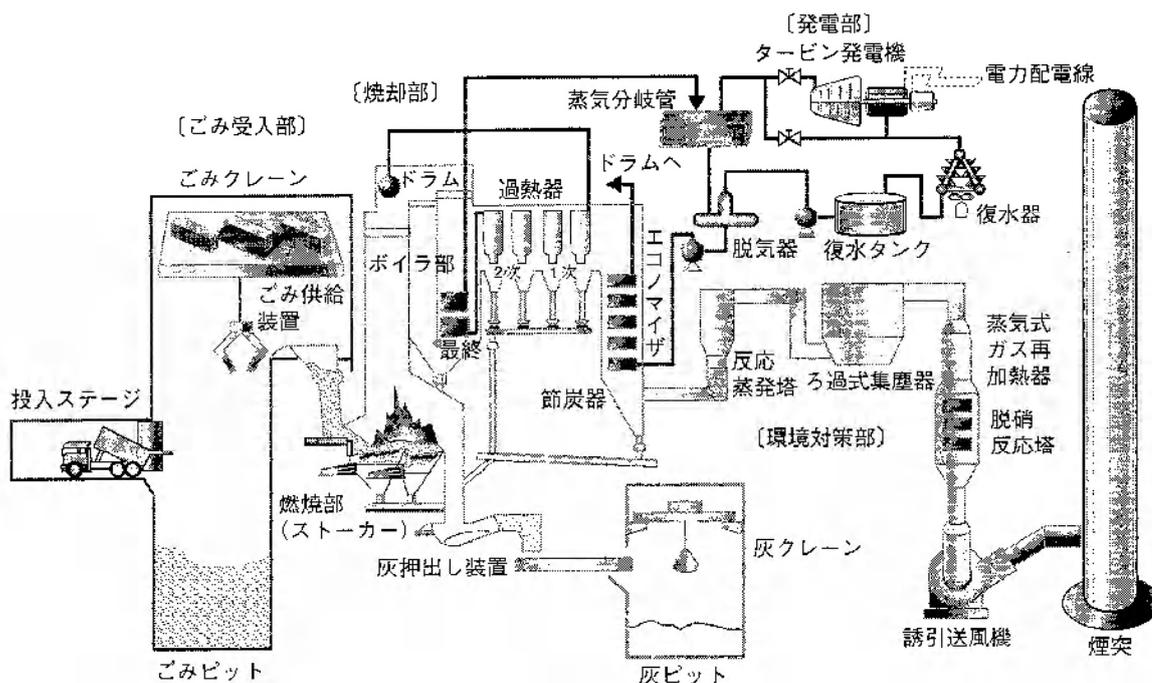


図1. 一般的な連続式の清掃工場（ストーカー式）

出典：“NEDO 技術開発機構 HP 掲載資料（2004年）

乾燥した蒸気は第3工程の蒸気タービンに送られ、直結する発電機を駆動させて発電する。タービンで膨張した蒸気は圧力と温度が下がり、第4工程の復水器に送られる。復水器では蒸気を冷却して凝縮させ、温水に戻してボイラー給水として循環させる。発電量を多くするには、タービンに入る蒸気の圧

力と温度をなるべく高くする一方、復水器でなるべく低い温度にまで冷却し、圧力落差を大きくするのが望ましい。復水器には空冷式と水冷式があるが、空冷式は蒸気を自動車のラジエーターのようなフィン（ひれ）のついた伝熱管に通し、外側から空気で冷やす方式である。フィンをつけるのは伝熱面積をなるべく大きくするためである。水冷式は多管式の熱交換器を使って、工業用水や海水で冷却する方式である。水冷式の方が空冷式より低温まで冷却できるので発電出力を大きくできるが、海水か工業用水が必要になる。工業用水を使う場合は循環利用するために、温度が高くなった冷却水を再び冷やす冷水塔が必要になる。冷水塔はオフィスの冷房に使われる冷水塔と同じ原理だが、容量が大きいので大型装置になり設備費が高くなる。また設置スペースが大きいので、市街地に建設されることの多い清掃工場には好まれない。

3. ごみ焼却発電の発電効率向上策

日本のごみ焼却発電の1号基は、1965年に稼動を開始した大阪市の旧西淀清掃工場である。このときは蒸気発電タービン入口温度を350℃、圧力を2.35MPaとし、23%の発電効率を達成した。復水器には水冷式を採用し、現在、多くの清掃工場が採用している空冷式より低い温度まで冷却して、圧力落差を大きくしたのも高い発電効率に寄与した。しかし蒸気過熱器で伝熱管の腐食損傷が多発したので、以降の建設から蒸気温度を300℃以下に抑えるようになった。清掃工場はごみ処理のための衛生施設として建設したのであり、発電は副次的な機能に過ぎなかった。このため、発電効率の向上よりも継続的な安定運転を重視したのである。また、ごみ焼却発電は出力が不安定なので、電力会社の購入価格が低かった。それに加えて、公共施設なので余剰電力を売却して収入を得る動機が希薄だった背景もある。このような状況から、これまでに建設された清掃工場は、規模の大きい全連続式でも発電をしないか、発電しても自家消費電力を賄う程度が多い。発電効率は表3に示すように5%から15%程度が多く、単純平均では11.7%に過ぎない（平成23年度）。

表3. 発電効率別の清掃工場数

発電効率	清掃工場数
20%以上	15
15%～20%	71
10%～15%	106
5%～10%	84
5%以下	27

表4に清掃工場の発電効率向上策を示す。技術的な対策だけでなく、政策や仕組みなど多面的な対策が有効である。表4の対策のうち、ごみ成分の改善は清掃工場が単独で実施できる方策ではない。このため、将来の方向として好ましいが実現性の見通しは明確でない。焼却設備の改善では、タービン入口蒸気の高温高圧化とタービン出口蒸気の低温低圧化が大きく貢献する。焼却設備自体の省エネルギー化では、燃焼排ガスの熱回収による空気の予熱が効果的で、エコマイザーを設置すればボイラー給水予熱にも使える。白煙防止は、煙突から出る排ガス中の水蒸気を見えなくするだけの情緒的な対策に過ぎない。冬場の低温時には煙突出口で白煙（霧）が発生するが、現在の煙突高さなら被害が発生することはない。法的な規制もなく、生産工場ではどこも採用していない。設置の必要性は希薄といってよい。

表 4. 発電効率の向上策

分野	課題	内容
ごみ成分改善	水分の低下	清掃工場で焼却しているごみ（一般廃棄物）には、水分が 35%～40%含まれている。厨芥など水分の多い生ごみは、デイスポーターで処理して下水処理場に送り、清掃工場で焼却するごみの水分を減らす。
	産業廃棄物の混合焼却	清掃工場は、オフィスやレストランなど業務用施設のごみも焼却しているが、一部の工場廃棄物（木くず、紙くずなど）も混合焼却する。
焼却設備改善	蒸気の高温化と高压化	耐腐食性の高い過熱器伝熱管を採用する。最近の伝熱管は 4MPa、400℃までは十分に耐えられ 450℃も可能。試験的には 500℃まで可。
	復水器の低温化と低压化	既存の清掃工場は空冷復水器の採用が多いが、水冷式を採用して蒸気の凝縮温度を下げる。圧力と温度の落差を大きくする。
	排ガスからの熱回収	ボイラーの下流に燃焼用空気とボイラー給水の予熱器を設置し、熱回収率を高める。煤塵対策と低温腐食対策が必要。
	白煙対策の抑制	多くの清掃工場が煙突から出る水蒸気を見えなくするために、排ガスを再加熱している。視覚的な対策に過ぎないので採用しない。
優遇施策	焼却発電の義務化	24 時間連続稼働の清掃工場には、一定の発電効率以上の発電を義務化する。ドイツを含めて数ヶ国がエネルギー回収の最低基準を設定。
	電力購入の義務化	電気事業者によるごみ発電の購入義務と、購入価格の基準設定。ヨーロッパでは数ヶ国が購入を義務化。また数ヶ国が購入価格の最低基準を設定。日本も再生可能エネルギーの利用促進のため、2012 年 7 月から電気事業者が kWh あたり 17 円の固定価格で買い取るようになった。ただし、プラスチックは再生可能エネルギー源ではないので、その寄与分は対象外。
運営体制	ESCO 方式の導入	既存の清掃工場を改善する場合は、設備工事事業者が発電効率向上の工事費を負担し、得られる売電増収益で工事費を回収する。工事費はリース会社の提供が多い。オフィスビルや業務用施設に適用事例が多い。
	PFI（民営）の導入	清掃工場の運営が民間に移管されれば収益インセンティブが強化され、廃棄物発電の拡大が促進される。アメリカは民営。ドイツは独立採算制。

注 1. ESCO： Energy Service Company の略

注 2. PFI： Private Finance Initiative の略

優遇施策では、電気事業者によるごみ焼却発電の買い取り制度が 2012 年から発効している。運営体制では、財政支出に代わる設備資金の調達方法として ESCO 方式の採用が可能であろう。この場合、設備改造工事の請負事業者が金融機関と協力して設備資金を調達し、清掃工場の売電増収益から数年にわたって回収する。この方法だと設備工事の請負事業者が既存設備の状況を診断し、必要な費用と売電増収益を見積もる。民間の事業者が自己責任で設

備費を売電増収益から回収するので、清掃工場を管理している地方自治体には設備資金需要も投資リスクも発生しない。ESCO方式をごみ焼却発電に採用した事例はないが、現実的な方法として積極的に具体化を検討する価値があると考えている（後述）。

発電量増大の動機（インセンティブ）については、民営化が一つの有力な方法と思われる。すでにアメリカは民営だが、アジア諸国でも民営が増えているし、中国にも大規模な民営清掃工場がある。一方、日本ではこれまで地方自治体が清掃工場を建設し運営していたので、民間には設備管理技術と運営のノウハウが十分に蓄積されていない。このため民営化の第1段階は自治体が設備を保有し、運営だけを民間に委託する官設民営が好ましいであろう。しかし、最終的には産業廃棄物の焼却工場と同様に、民間が清掃工場を建設し運営する方式が好ましいと考えている。

なお、アメリカでは日本で広く採用されている行政区域ごとの自区内処理原則がない。ワシントンでは民間の清掃事業者が近隣50の市町村と処理量と処理価格について契約し、ごみを大規模な清掃工場に集めて焼却している。興味深いのはアメリカで採用されている「Put or Pay」という契約である。この方式では地方自治体が委託処理するごみの量を保証し、不足する場合は処理事業者の収益低下を補償する。ごみ処理事業者は、自治体が提示するごみの排出量を前提に設備を建設し運営する。このため、処理量が計画より少なければ設備の稼働率が低下し、売電収入も減って損失が発生する。したがって、その損失を委託側の自治体が補償するのは当然という考えである。アメリカの合理主義と契約社会の興味深い一例ではないだろうか。ただし、アメリカでも地域の環境保全は、住民を代表する地方自治体の責務である。このため、全体的な計画の立案と必要なら用地の確保、ごみ処理請負事業者の選定と契約、継続的な運営の健全性確認は地方自治体の責務である。

（その2）に続く